

**CONTROL NO LINEAL DE POTENCIA APARENTE
BASADO EN PASIVIDAD DE UN CONVERTIDOR
MONOFÁSICO APLICADO A LA GENERACIÓN
DISTRIBUIDA.**

DAVID VALENCIA GONZÁLEZ

Trabajo de grado presentado como requisito
parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista

Director
M.Sc. Oscar Danilo Montoya Giraldo

Co-Director
Ph.D. Alejandro Garcés Ruiz

Pereira, Abril de 2018
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Programa de Ingeniería Eléctrica



Nota de Aceptación

M.Sc. Oscar Danilo Montoya Giraldo. Director

Ph.D. Alejandro Garcés Ruiz. Co-Director

Jurado

Pereira, Abril de 2018

CONTROL NO LINEAL DE POTENCIA APARENTE BASADO EN PASIVIDAD DE UN
CONVERTIDOR MONOFÁSICO APLICADO A LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA.
©DAVID VALENCIA GONZÁLEZ

Pereira, Abril de 2018

Programa de Ingeniería Eléctrica

Universidad Tecnológica de Pereira

Carrera 27 No 10-02 Barrio Alamos - Risaralda - Colombia

TEL: (+57)(6)3137122

www.utp.edu.co

Versión web disponible en: *<http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesis/index.html>*

Dedicatoria

Este trabajo esta dedicado a:

A mis padres

Por apoyarme incondicionalmente y motivarme a continuar el crecimiento en cada una de las facetas de mi vida, por el ejemplo a seguir que han representado para mi, por la gran cantidad de esfuerzos que han realizado para que yo continúe con mis estudios académicos y por el gran amor que me brindan.

Este trabajo no habría sido posible sin la gran contribución por parte de ellos

A mis maestros y compañeros

Por compartirme sus conocimientos y experiencias de vida, la contribución de este grupo de personas ha sido sumamente importante en mi desarrollo como persona y profesional además su apoyo ha contribuido en gran medida a mis ganas de seguir adelante con mi carrera profesional.

Cada una de estas personas han dejado una parte de su esencia en mi.

A mi familia

Por la confianza puesta en mi, por sus consejos y continuo apoyo, los amo.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por ser el apoyo incondicional en mi vida y por motivarme a buscar un futuro mejor y superar cada una de las dificultades que se han presentado, a mis amigos por compartir conmigo alegrías y tristezas, a mi director Oscar Danilo Montoya Giraldo y a mi co-director Alejandro Garcés Ríuz, por el tiempo, colaboración y paciencia brindados para la realización de este trabajo de grado y a la universidad por permitirme vivir innumerables experiencias.

Resumen

En este trabajo de grado, se plantea el problema de controlar el flujo de potencia activa y reactiva proveniente de una micro-red que puede modelar un sistema de generación de energía basado en fuentes renovables o una batería utilizada para un vehículo eléctrico, en ellos dos primeros casos se desea inyectar toda la potencia activa disponible proveniente de la fuente de generación renovable y compensar la máxima potencia reactiva posible, en el tercer caso se desea cargar la batería del vehículo y mostrar que una vez cargada esta puede ayudar a la red en los picos de consumo, de la misma forma que en el primer caso se desea compensar el máximo posible de potencia reactiva a la red.

La evaluación de la estrategia de control en los dos primeros casos, se lleva a cabo observando que efectivamente se inyecta a la red toda la potencia activa disponible en el caso de la potencia reactiva se observa que sigue la referencia dada.

En el tercer caso se observa que tanto la inyección como la absorción de energía de la red de distribución se realiza siguiendo la referencia dada y para el caso de la potencia reactiva se realiza la misma consideración que en el sistema de prueba 1 y 2.

En todos los casos se compara el desempeño de la estrategia de control con otra señal de control basada en pasividad y una señal de control basada en las técnicas clásicas (PI).

Los resultados acá presentados permiten evidenciar que los controladores basados en pasividad se comportan de una manera robusta frente a grandes cambios en las referencias dadas, además de garantizar la estabilidad del sistema y también muestran que este tipo de técnica de control se comporta de una manera mas optima respecto a las técnicas de control clásicas.

Índice general

Resumen	III
Índice general	V
Índice de tablas	VI
Índice de figuras	VIII
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. Estado del arte	4
1.5. Estructura del trabajo de grado	7
2. Modelo del Convertidor	9
2.1. Sistema	9
2.2. Modelo Matemático	10
2.3. Equivalente de Hamilton	10
3. Metodología de Solución	12
3.1. Descripción de la metodología	12
3.2. Diseño del controlador	14
3.3. Selección de las señales de referencia	14
3.3.1. V_{dc}^*	14
3.3.2. i_k^*	14

4. Aplicación y Resultados	17
4.1. Consideraciones	17
4.2. Sistemas de Prueba	19
4.2.1. Sistema de Prueba 1	20
4.2.2. Sistema de Prueba 2	24
4.2.3. Sistema de Prueba 3	27
5. Conclusiones	34
5.1. Trabajos futuros	34
Bibliografía	37

Índice de tablas

4.1. Parámetros del controlador	19
4.2. Parametros del FEC y la red	19

Índice de figuras

2.1. Convertidor de frente activo (FEC)	10
4.1. Etapa de Potencia	18
4.2. Etapa de control	18
4.3. Sistema de prueba 1.	20
4.4. Curva de corriente del panel solar.	20
4.5. Curvas de potencia activa y reactiva panel solar con el controlador 1. .	21
4.6. Error de la corriente controlador 1 caso panel solar.	22
4.7. Curvas de potencia activa y reactiva panel solar con el controlador 2. .	22
4.8. Error de la corriente controlador 2 caso panel solar.	23
4.9. Curvas de potencia activa y reactiva panel solar con el controlador 3. .	23
4.10. Error de la corriente controlador 3 caso panel solar.	24
4.11. Sistema de prueba 2.	25
4.12. Curva de corriente generador eólico.	25
4.13. Curvas de potencia activa y reactiva generador eólico con el controlador 1.	26
4.14. Error de la corriente controlador 1 caso generador eólico.	26
4.15. Curvas de potencia activa y reactiva generador eólico con el controlador 2.	27
4.16. Error de la corriente controlador 2 caso generador eólico.	28
4.17. Curvas de potencia activa y reactiva generador eólico con el controlador 3.	28
4.18. Error de la corriente controlador 3 caso generador eólico.	29
4.19. Sistema de prueba 3.	29
4.20. Curva de corriente batería.	30
4.21. Curvas de potencia activa y reactiva para la batería con el controlador 1.	31
4.22. Error de la corriente controlador 1 caso batería.	31
4.23. Curvas de potencia activa y reactiva para la batería con el controlador 2.	32
4.24. Error de la corriente controlador 2 caso batería.	32
4.25. Curvas de potencia activa y reactiva para la batería con el controlador 3.	33

ÍNDICE DE FIGURAS

VIII

4.26. Error de la corriente controlador 3 caso batería.	33
---	----

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

En los últimos años estamos viendo cambios importantes en los sistemas energéticos que llevarán a canastas energéticas más diversificadas con tendencia a incorporar energéticos y tecnología más limpias, a propiciar mejores usos de la energía y a contar nuevas formas de hacer negocios. Las preocupaciones por la seguridad del suministro energético, por reducir el impacto sobre el medio ambiente, mejorar las condiciones de adaptabilidad a los cambios del clima y por incorporar elementos de competencia en la entrega de los servicios energéticos hacia una mayor eficiencia; unido a los desarrollo en las tecnologías de información, comunicaciones y a las metodologías de control y monitoreo han producido resultados interesantes y en vista de la necesidad de minimizar el impacto negativo al ambiente con la construcción de un sistema sostenible hasta donde sea posible [1]. Este documento se enfocara en la interconexión de la generación distribuida con fuentes renovables a la red de distribución.

Una de las alternativas viables para reducir el cambio climático es incentivar el uso de las energías renovables y de esta manera reducir el uso de los combustibles fósiles como solución a la necesidad de generar energía, A pequeña escala se puede plantear la integración de la generación distribuida basada en fuentes renovables de energía como son los paneles solares u otras alternativas de energías limpias e incentivar el uso de nuevas tecnologías para la movilidad como son los vehículos impulsados con energía eléctrica.

El termino generación distribuida se puede definir como una fuente de energía eléctrica directamente conectada a la red de distribución o directamente en la ubicación del

cliente, este tipo de generación trae consigo varias ventajas como son la reducción de las pérdidas relacionadas con la transmisión de la energía desde los grandes centros de generación hasta los grandes centros de consumo, la reducción del costo energético para el cliente final y mejoras en la calidad de la energía [2]

Por otra parte los vehículos de combustión interna que funcionan utilizando como combustible gasolina o diésel contribuyen en gran medida a las emisiones de CO₂, generan gran contaminación auditiva en las ciudades y además generan otro fenómeno llamado smog el cual se observa sobre las ciudades más contaminadas dificultando la visión, respiración y aportando de esta manera al deterioro de la calidad de vida y sobre-costos para la salud y la economía. Las tendencias muestran una pronta transición hacia vehículos híbridos y eléctricos y se esperaría que en el largo plazo el hidrógeno se convierta en una alternativa viable [1];

Tanto vehículos eléctricos como la integración de la generación distribuida, requieren para su implementación el desarrollo de varias tecnologías:

- En el caso de los vehículos, estos sistemas son:

Un banco de baterías para almacenamiento de la energía a utilizar, motores/alternadores eléctricos diseñados para que permitan tanto propulsar el vehículo cuando se desea avanzar y recuperar la energía cinética del vehículo cuando se requiere frenar, un inversor que permita convertir la energía de CC almacenada en las baterías a energía en AC para alimentar el motor del vehículo, cargadores de baterías que permitan la absorción de la energía de la red eléctrica cumpliendo algunos estándares tanto para cuidar la vida útil de las baterías como para evitar que se presente distorsión en la red eléctrica, sistemas que permitan que cuando la batería del vehículo este totalmente cargada esta pueda ayudar a mejorar la calidad de la energía de la red realizando funciones como control de reactivos inyección de potencia a la red cuando se requiera y la capacitación de personal para el adecuado mantenimiento de este tipo de automotores.

- En el caso de la interacción de la generación distribuida basada en fuentes renovables aparecen nuevos retos debido en la operación de estos sistemas, pues se deben mantener los índices de calidad de energía, es decir que se debe mantener la frecuencia y la magnitud de la tensión en valores permitidos, es allí donde aparece un nuevo concepto llamado micro-red, una micro-red esta compuesta normalmente por generadores distribuidos, dispositivos de almacenamiento de energía y cargas que pueden operarse en modo conectado a la red y en modo isla, la micro-red debe tener la capacidad de manejar de manera segura, confiable y eficiente los

recursos energéticos disponibles con el fin de atender la demanda de una manera adecuada [3].

Con la aparición del concepto de micro-red se requiere el uso de convertidores de potencia como rectificadores e inversores además de técnicas avanzadas de control para manejar adecuadamente estos convertidores y cumplir con los requisitos de calidad de energía además de permitir un flujo de potencia bidireccional[4].

En este documento se va a estudiar el modelo del convertidor por fuente de tensión AC/DC para el cual se requiere desarrollar una estrategia que permita controlar el flujo de potencia activa y reactiva con el fin de manejar diferentes recursos integrados a la red los cuales podrían ser paneles solares, turbinas eólicas o bancos de baterías los cuales pueden ser la batería de un vehículo eléctrico.

1.2. Justificación

El cambio climático es un problema que debe ser abordado de forma inmediata, sus efectos en nuestro entorno cada vez se hacen más visibles los cuales van desde el descongelamiento de los glaciares, la pérdida de playas y erosión costera o la aparición cada vez más frecuente de eventos extremos como lluvias intensas o sequías en zonas en las cuales anteriormente no ocurrían, por lo cual se requiere realizar cambios significativos en la forma en la que se utilizan los recursos disponibles. Con este panorama la vista, la implementación e incentivación al uso de energías renovables representa una propuesta interesante para contribuir a la solución de esta problemática puesto que de esta manera se puede reducir significativamente la emisión de gases que producen efecto invernadero en la atmósfera.

Las micro-redes son una alternativa viable para abastecer con energía eléctrica comunidades aisladas a las cuales no cuentan con este servicio a la dificultad para ser conectadas al sistema interconectado nacional (SIN) puesto que no es económicamente viable, además permiten aprovechar de una manera mas eficiente los recursos disponibles, contribuyendo de esta manera al mejorar la calidad de vida e impulsar el desarrollo economico de estas comunidades.

El gran avance que a tenido la electrónica de potencia en los últimos años combinado con las técnicas de control modernas permiten solucionar de una manera óptima el problema de la integración de los sistemas de generación distribuida a la red de distribución, y aunque existen técnicas de control utilizadas con este propósito se desea

investigar el comportamiento de técnicas de control diferentes con el fin de obtener mejores resultados.

Con el fin de comparar resultados con técnicas de control utilizadas anteriormente para dar solución a este problema se realizarán simulaciones en el software SIMULINK de MATLAB.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar una estrategia de control que permita al convertidor controlar el flujo de potencia activa y reactiva desde y hacia la red de distribución integrando fuentes de energía renovables.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un controlador basado en la dinámica del sistema que permita controlar el flujo bidireccional de potencia activa y reactiva.
- Realizar simulaciones para evaluar los resultados.
- Realizar el análisis de los resultados obtenidos y compararlos con una técnica clásica de control.
- Redactar el documento final.

1.4. Estado del arte

Ante la necesidad de enfrentar el cambio climático y ante el aumento de los costos energéticos, el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles y la creciente demanda de alternativas ecológicas para la movilidad, aparece como alternativa de gran relevancia la integración de la generación distribuida basada en fuentes de energía renovables las cuales requieren técnicas de control para manejar de manera eficiente segura y confiable el flujo de potencia en estos sistemas.

Sobre este tema se han adelantado diferentes estudios que han contribuido de manera importante al desarrollo de estos sistemas, haciéndolos cada vez eficientes y confiables. Estos estudios y sus resultados experimentales han sido publicados a lo largo de los años por diferentes revistas científicas del sector eléctrico como la revista IEEE, science direct entre otras; los cuales se describen brevemente a continuación:

En el año 2002, se habla acerca del control basado en pasividad, el cual ha demostrado ser muy potente para diseñar controladores diseñados a partir de las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange para controlar sistemas físicos de naturaleza mecánica, pues permite estabilizarlos a través del equilibrio de energía; sin embargo se han encontrado debilidades al aplicarlos en sistemas electromecánicos o eléctricos e incluso en algunos dispositivos mecánicos subactuados, por lo tanto este autor se centra en desarrollar una nueva teoría de control basado en pasividad que permita manejar los sistemas anteriormente mencionados, cambiando el modelo de las ecuaciones de Euler-Lagrange por un modelo no lineal hamiltoniano controlado por puerto[5].

Para el año 2005, se presentó una estrategia de control basado en pasividad de asignación de interconexión y amortiguación (IDA-PBC), para un rectificador de puente completo en el cual se garantiza un factor de potencia unitario para la red de corriente alterna y controla la regulación de tensión para el lado de corriente continua; para diseñar el controlador se utilizó la técnica de modelado de sistemas en variables de estado (GSSA) obteniendo como resultado un sistema robusto ante las variaciones de la carga. [6].

En el año 2011 se propone un sistema de paneles solares con máximo punto de transferencia de potencia conectado a la red eléctrica de distribución mediante un convertidor VCS de única etapa, donde se propone una estrategia de control que funciona de la siguiente manera, durante el día el sistema envía toda la potencia activa disponible a la red y a la misma vez compensa la potencia reactiva de la carga por medio del inversor, mientras que en la noche el convertidor únicamente compensa la potencia reactiva de la carga. La estrategia de control utilizada se basa en la teoría p-q que permite simplificar los cálculos algebraicos necesarios para sincronizar el inversor con la red [7].

En el año 2012 se propone un modelo de control que permite regular la potencia de entrada en un convertidor AC-DC, en lugar de controlar la tensión de salida usando un

enfoque de control no lineal óptimo basado en la función de control de lyapunov (CFL), en el documento se muestra que este tipo de control utilizado en el convertidor AC-DC de frente activo (FEC) tiene una respuesta más rápida que al utilizar el controlador convencional de corrección de factor de potencia (PFC); adicional a esto se representan los resultados experimentales que demuestran el comportamiento superior de este controlador[8].

En estudio presentado en el año 2013, se propone un cargador integrado que utiliza los componentes de tracción del vehículo como el inversor y el motor en el sistema de carga de las baterías, aprovechando que en el momento de la carga estos elementos quedan inutilizados. La configuración propuesta por los autores consiste en un cargador integrado al vehículo, con flujo de potencia bidireccional, con aislamiento de alta potencia galvánico basado en el devanado de una maquina eléctrica especial; el inversor es utilizado también en el sistema de carga e incluso el embrague mecánico es utilizado para desconectar la maquina giratoria de la relación mecánica del vehículo, por lo cual se requiere un mínimo de componentes adicionales [9]. En investigación publicada en 2014 se propone un cargador de batería reconfigurable que posee tres diferentes modos de operación, a saber:

1. Modo red eléctrica a vehículo (G2V), en el cual las baterías de tracción del vehículo absorben energía de la red eléctrica.
2. Modo vehículo a red eléctrica (V2G), donde las baterías de tracción devuelven parte de la energía a la red eléctrica.
3. Modo tracción-auxiliar (T2A), en el cual la batería auxiliar se carga de las baterías de tracción.

En los dos primeros modos de operación, el cargador permite la regulación de la potencia reactiva y siempre funciona con una forma de onda de corriente sinusoidal en toda la gama de operación, contribuyendo de esta forma a la regulación de la tensión, esto a través de un algoritmo de sincronización con la red que consiste en una PLL (phase locked loop) $\alpha - \beta$ monofásica, con el fin de operar siempre con una corriente sinusoidal, aunque se tenga una tensión distorsionada. Para el tercer modo de operación permite cargar la batería auxiliar del vehículo con la energía almacenada en las baterías de tracción, función que rara vez es incluida en los cargadores de baterías. Para cumplir con este objetivo, se utiliza electrónica de potencia (IGBTs) combinado con

un transformador de alta frecuencia que a su vez proporciona un aislamiento galvánico entre las baterías de tracción y el chasis del vehículo [10].

En el año 2015 se presenta el diseño e implementación de un cargador monofásico para vehículos eléctricos que proporciona un soporte de energía reactiva a la red eléctrica y además permite cargar la batería del vehículo. Este cargador consta de dos etapas, un convertidor AC-DC de puente completo y un convertidor DC-DC bidireccional de medio puente; además cuenta con un sistema de control que recibe la carga activa y las entradas de potencia reactiva de la red eléctrica y ajusta la corriente de línea y la corriente de la batería sin exceder los límites de THD [11].

En este mismo año se presenta un metodo que permite mejorar los indices de calidad de energia mediante el control del flujo de potencia aparente entre la micro-red y la red de distribucion a traves de un inversor, en este trabajo se utiliza la transformada de park para obtener las corrientes de eje directo y cuadratura con el fin de desacoplar la potencia activa de la reactiva y se aplica un controlador tipo (PI) con realimentacion y otro con tecnicas de control predictivo [4].

En el año 2016 se propone la administración de forma independiente de la potencia activa y reactiva para un sistema de paneles solares interconectado a la red eléctrica utilizando un enfoque de control no lineal para el convertidor, en donde en lugar de tomar como referencia las corrientes de eje directo y de cuadratura se toman como variables de control las potencias activa y reactiva instantáneas [12].

En el mismo año en otro trabajo se propone la interconexión de dos micro-redes mediante un convertidor VSC aplicando técnicas de control de forma local, con el fin de mantener la frecuencia bajo situaciones de emergencias, de esta manera se pueden enviar potencia entre las microredes en casos de emergencia sin la necesidad de realizar un enlace de comunicación entre las micro-redes [3].

1.5. Estructura del trabajo de grado

Este proyecto está estructurado de la siguiente manera: en el Capítulo 2 se presenta la descripción y el modelo matemático del convertidor AC/DC, adicionalmente se representa el modelo de la forma Hamiltoniana controlada por puerto (PCH) lo cual sera

de utilidad a la hora de diseñar el control. En el capítulo 3 se presenta la metodología de control propuesta para la solución del problema planteado. En el Capítulo 4 se presenta el sistema de prueba desarrollado en el software SIMULINK de MATLAB en el cual se puede evaluar el desempeño de la estrategia de control basada en pasividad y observar que se alcanza la estabilidad del sistema en los puntos deseados. Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones obtenidas a partir de este trabajo y las propuestas sobre trabajos futuros relacionados al tema. Finalmente se encuentran las referencias bibliográficas.

Capítulo 2

Modelo del Convertidor

A continuación se presenta el convertidor que posee dos modos de operación, como inversor para entregar energía a la red, o como rectificador para absorber energía de la red, luego se obtiene el modelo matemático del convertidor haciendo uso de las leyes de kirchhoff, finalmente se presenta el modelo en la forma hamiltoniana controlada por puerto.

2.1. Sistema

Para realizar este trabajo se selecciono convertidor de frente activo (FEC), el cual esta compuesto por un filtro RL a través del cual pasa una corriente que denominaremos i_k y un puente completo de transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT) el cual se controla con la señal de control m , este se encuentra conectado en cascada con un condensador que realiza el acople DC con el recurso energético renovable, el cual puede ser un panel solar o una batería.

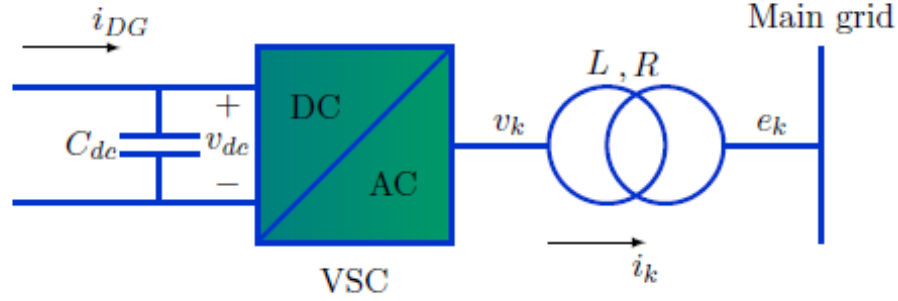


Figura 2.1: Convertidor de frente activo (FEC)

2.2. Modelo Matemático

Para obtener el modelo matemático que describe la dinámica del sistema se hace uso de las leyes de Kirchhoff. A partir de este planteamiento se obtiene el sistema de ecuaciones.

$$L(\dot{i}_k) = mV_{dc} - i_k R - e_k \quad (2.1)$$

$$C_{dc}(\dot{V}_{dc}) = i_{dc} - i_k \quad (2.2)$$

Donde i_k es la corriente entregada a la red, V_{dc} es la tensión en el capacitor, e_k es la tensión de la red e i_{dc} es la corriente suministrada o absorbida por el recurso energético; m es el índice de modulación del FEC, finalmente L y R son la inductancia y la resistencia del filtro del FEC.

El conjunto de ecuaciones 2.1 y 2.2 se puede representar de la forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C_{dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_k \\ \dot{V}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & m \\ -m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_k \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -e_k \\ i_{dc} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.3. Equivalente de Hamilton

Con el fin de diseñar un control basado en pasividad, la dinámica del sistema puede ser representada por el modelo hamiltoniano controlado por puerto de la forma:

$$D\dot{x} = (J(m) - R)(x) + \xi \quad (2.4)$$

Donde:

$$J = \begin{vmatrix} 0 & m \\ -m & 0 \end{vmatrix};$$

$$R = \begin{vmatrix} R & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}; \quad \xi = \begin{vmatrix} -e \\ i_{dc} \end{vmatrix}; \quad x = \begin{vmatrix} i_k \\ V_{dc} \end{vmatrix}; \quad D = \begin{vmatrix} L & 0 \\ 0 & C_{dc} \end{vmatrix}.$$

Capítulo 3

Metodología de Solución

El objetivo de la estrategia de control propuesta es controlar la potencia activa inyectada o absorbida por el recuso energético y el flujo de potencia reactiva.

3.1. Descripción de la metodología

A continuación se describe el diseño del controlador, el cual consiste en lograr que las variables de estado del sistema 2.4 sigan un vector de referencia deseado x^* .

$$x^* = \begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_k^* \\ V_{dc}^* \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

con el fin de cumplir con el objetivo se propone diseñar una ley de control u , que permita que el vector de referencia se convierta en un nuevo punto de estabilidad del sistema. Donde la dinámica deseada del sistema esta definida por la ecuación:

$$\dot{x}^* = (J(u^*) - R) x^* + \xi \quad (3.2)$$

las señales de error son:

$$\bar{x} = x - x^* \quad (3.3)$$

$$\bar{u} = u - u^* \quad (3.4)$$

donde:

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

y

$$u = m$$

reemplazando las ecuaciones 3.3 y 3.4 en 2.4 se tiene:

$$D(\bar{x} + x^*) = (J(\bar{u} + u^*) - R)(\bar{x} + x^*) + \xi$$

$$D(\dot{\bar{x}} + \dot{x}^*) = J(\bar{u}\bar{x} + \bar{u}x^* + u^*\bar{x} + u^*x^*) - R(\bar{x} + x^*) + \xi$$

Si se resta la ecuación 3.2 a la ecuación anterior se obtiene:

$$D(\dot{\bar{x}}) = J(\bar{u}\bar{x} + \bar{u}x^* + u^*\bar{x}) - R(\bar{x})$$

reemplazando nuevamente las ecuaciones 3.4 se obtiene:

$$D\dot{\bar{x}} = J(u\bar{x} + \bar{u}x^*) - R\bar{x}$$

organizando se tiene:

$$D\dot{\bar{x}} = (Ju - R)\bar{x} + (J\bar{u})x^* \quad (3.5)$$

Si proponemos la siguiente función candidata de Lyapunov :

$$V(\bar{x}) = \frac{1}{2}\bar{x}^T D\bar{x} > 0 \quad (3.6)$$

y su derivada temporal:

$$\dot{V}(\bar{x}) = \bar{x}^T D\dot{\bar{x}} < 0 \quad \forall x \neq x^* \quad (3.7)$$

reemplazando 3.5 en 3.7 se obtiene:

$$\dot{V}(\bar{x}) = \bar{x}^T (Ju - R)\bar{x} + \bar{x}^T (J\bar{u})x^*$$

resolviendo esta ecuación se obtiene:

$$\dot{V}(\bar{x}) = \bar{x}^T (-R\bar{x} + J\bar{u}x^*) \quad (3.8)$$

$$y^T = \bar{x}^T Jx^* \quad (3.9)$$

$$\bar{u} = -Kpy \quad (3.10)$$

3.2. Diseño del controlador

Como se desea controlar el flujo de potencia, la variable a controlar es i_k , además de debe garantizar que la tensión en el capacitor de acople V_{dc} permanezca constante en su valor nominal. Partiendo de la ecuación 3.8 se puede obtener la ley de control para el sistema como se muestra:

$$m^* = \frac{e_k + Ri_k^* + Li_k^*}{V_{dc}^*} \quad (3.11)$$

La señal de control que permite minimizar el error se puede obtener de las ecuaciones 3.9 y 3.10 como se muestra:

$$\begin{aligned} y^T &= \begin{bmatrix} \bar{i}_1 & \bar{V}_{dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_k^* \\ V_{dc}^* \end{bmatrix} = V_{dc}^* i_k - i_k^* V_{dc} = y \\ \bar{m} &= -Kpy = -Kp(V_{dc}^* i_k - i_k^* V_{dc}) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Luego la señal moduladora para el convertidor esta dada por la suma de las ecuaciones 3.11 y 3.12:

$$m = m^* + \bar{m} = \frac{e + Ri_k^* + Li_k^*}{V_{dc}^*} - Kp(V_{dc}^* i_k - i_k^* V_{dc}) \quad (3.13)$$

3.3. Selección de las señales de referencia

3.3.1. V_{dc}^*

Para el caso de la referencia de tensión en la barra DC basta con tomar como referencia la tensión nominal del capacitor como se muestra en la siguiente ecuación:

$$V_{dc}^* = V_{nom} = 400[V]. \quad (3.14)$$

3.3.2. i_k^*

Teniendo en cuenta que en condiciones de estado estable, la red de distribución opera con frecuencia y magnitud constantes, se consideran las ecuaciones de estado estacionario para e_k e i_k considerando un factor de potencia en atraso:

$$e(t) = \sqrt{2}V_{rms}\cos(\omega t)[V] \quad (3.15)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I_{rms}\cos(\omega t - \theta)[A]. \quad (3.16)$$

Para representar la potencia aparente de la red se usa la siguiente representación en donde se separa esta potencia aparente en componentes real e imaginaria:

$$S = V_{rms}\angle 0 I_{rms}\angle \theta = P + jQ \quad [VA]. \quad (3.17)$$

donde j corresponde a la unidad imaginaria. Para controlar la potencia aparente de la fuente se deben seleccionar los valores promedio deseados para las potencias activa (P_{ac}^*) y reactiva (Q_{ac}^*) y se puede separar la ecuación 3.17 en parte real e imaginaria como se muestra a continuación:

$$P_{ac}^* = V_{rms}I_{rms}\cos(\theta)[W]. \quad (3.18)$$

$$Q_{ac}^* = V_{rms}I_{rms}\sin(\theta)[Var]. \quad (3.19)$$

El valor de I_{rms} y θ se pueden obtener de forma sencilla de las ecuaciones 3.18 y 3.19:

$$I_{rms} = \frac{1}{V_{rms}}\sqrt{(P_{ac}^*)^2 + (Q_{ac}^*)^2} \quad (3.20)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{Q_{ac}^*}{P_{ac}^*}\right) \quad (3.21)$$

Para controlar el flujo de potencia aparente de la red se requiere obtener la componente del eje cuadratura de la señal de voltaje, así la corriente $i_k(t)$ puede expresarse de la siguiente manera:

$$i_k(t) = \sqrt{2}(I_{rms}^R\cos(\omega t) + I_{rms}^I\sin(\omega t)) \quad (3.22)$$

Donde $I_{rms}^R = I_{rms}\cos(\theta)$ y $I_{rms}^I = I_{rms}\sin(\theta)$ corresponden a las componentes real e imaginarias de i_k respectivamente.

Para generar una señal ortogonal para la señal sinusoidal se puede usar un generador de cuadratura propuesto en la literatura [13] basado en espacio de estados como se muestra a continuación:

$$\begin{vmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -k_{sync} & \omega_0 \\ -\omega_0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} z_1 \\ z_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} k_{sync} \\ 0 \end{vmatrix} e_k(t) \quad (3.23)$$

$$\begin{vmatrix} e_{\parallel}(t) \\ e_{\perp}(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \pm 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} z_1 \\ z_2 \end{vmatrix} \quad (3.24)$$

Donde ω_0 corresponde a la frecuencia nominal de la red, K_{sync} es un parámetro que permite ajustar la tensión, $e_{\parallel}(t)$ representa la componente paralela de la tensión y $e_{\perp}(t)$ corresponde a la señal de cuadratura de la tensión. Por ultimo z_1 y z_2 son las variables de estado intermedias para realizar la estimación de las componentes paralelas y en cuadratura de $e_k(t)$ con el fin de que se encuentren en fase y cuadratura respectivamente respecto a la señal de tensión .

En la matriz de salida los valores $e_{\perp}(t) = \pm z_2$ significa que si el signo es positivo $e_{\perp}(t)$ esta adelantando a $e_{\parallel}(t)$, si el signo es negativo $e_{\perp}(t)$ esta atarazando a $e_{\parallel}(t)$.

Capítulo 4

Aplicación y Resultados

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos a través de la implementación computacional de la metodología propuesta en el capítulo 3. Para verificar la validez del modelo matemático propuesto, son empleados tres sistemas de prueba que permitirán evaluar el desempeño del controlador propuesto mediante el método IDA-PBC. El diseño e implementación del sistema de prueba se realizó en MATLAB / SIMULINK 2017a utilizando un computador portátil con las siguientes características: Intel (R) Core(TM) i5-7200U, 2.5 GHZ con Windows 10 Home de 64 bits. Para resolver las ecuaciones diferenciales del modelo dinámico del convertidor se utiliza la función ODE3 de MATLAB.

En las figuras 4.1 y 4.2 se muestra la implementación del sistema en SIMULINK con su respectivo controlador.

Con el fin de comparar el desempeño de este controlador (controlador 1) se comparan los resultados con los obtenidos con un controlador diseñado en un trabajo similar [14] (controlador 2) y con un controlador clásico PI (controlador 3).

4.1. Consideraciones

En los sistemas de prueba, la corriente i_{dc} es la que alimenta el barraje DC, esta corriente es la que modela el sistema de generación distribuida y a su vez hace parte de una micro-red, pero se debe tener en cuenta que este trabajo no se tiene como objetivo controlar dicha micro-red.

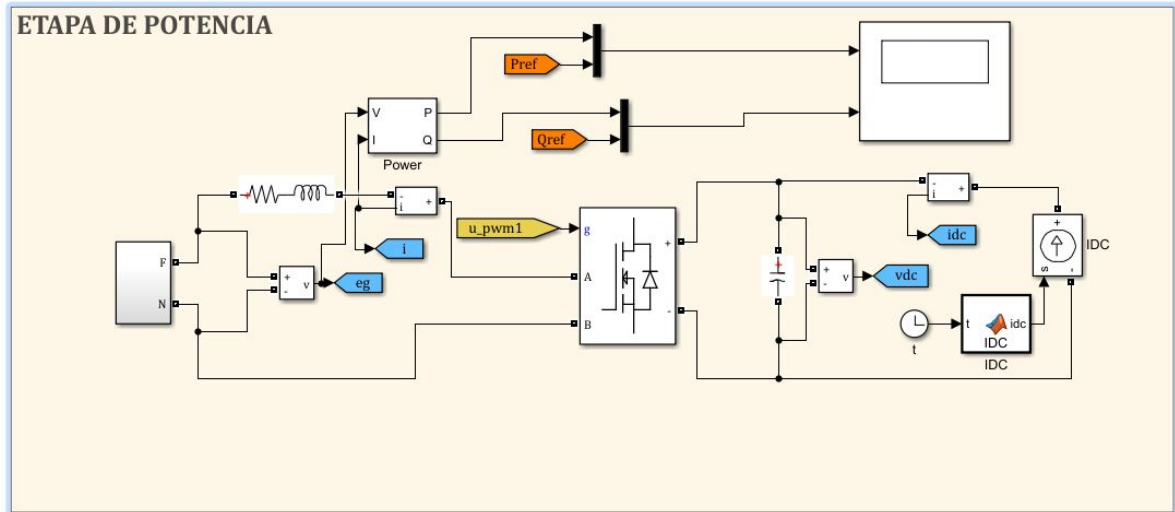


Figura 4.1: Etapa de Potencia

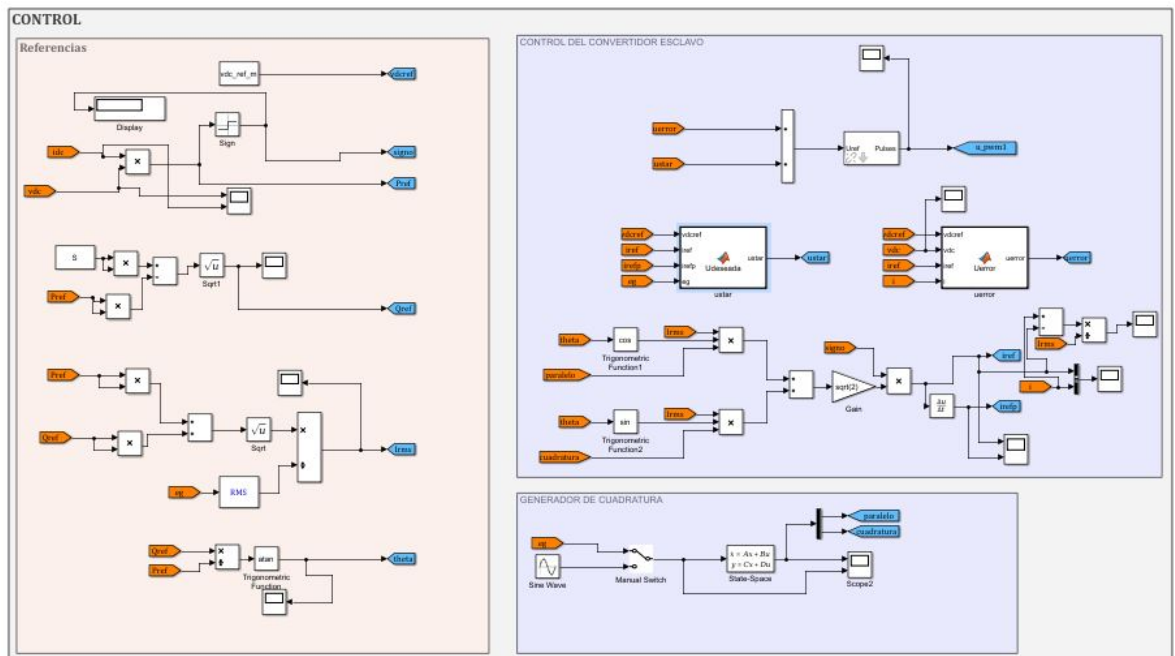


Figura 4.2: Etapa de control

Para efectos de simulación se considera el sistema de generación distribuida como una fuente de potencia $P(t)$ donde:

$$P_{dc}(t) = i_{dc}(t)V_{dc}(t) \quad (4.1)$$

Los Parámetros empleados en el controlador se muestran en la tabla 4.1 y los parámetros utilizados para modelar el FEC y la red en la Tabla 4.2.

Tabla 4.1: Parámetros del controlador

Parámetro	Valor
Kp	2

Tabla 4.2: Parametros del FEC y la red

Parámetro	Valor
R	0 [Ω]
L	2.5 [mH]
C_{dc}	18800 [μ F]
e_k	311 [V]
f	50 [Hz]

$$K_{sync} = 600 \quad (4.2)$$

Es de notar que tanto los parámetros del controlador como los parámetros del FEC permanecen constantes para los tres sistemas de prueba.

En todos los casos se considera que la potencia aparente S del recurso renovable es equivalente a:

$$S = 12000[VA]$$

4.2. Sistemas de Prueba

4.2.1. Sistema de Prueba 1

Para el sistema de prueba 1 mostrado en la figura 4.3 se va a considerar que como fuente de energía renovable un panel solar donde la corriente proveniente de la micro-red i_{dc} se modela teniendo en cuenta una curva de radiación solar como se muestra en la figura 4.4, en este caso el flujo de potencia activa es unidireccional, va desde la fuente de energía renovable hacia la red de distribución. El objetivo del controlador es inyectar toda la potencia activa disponible y compensar la máxima energía reactiva disponible.

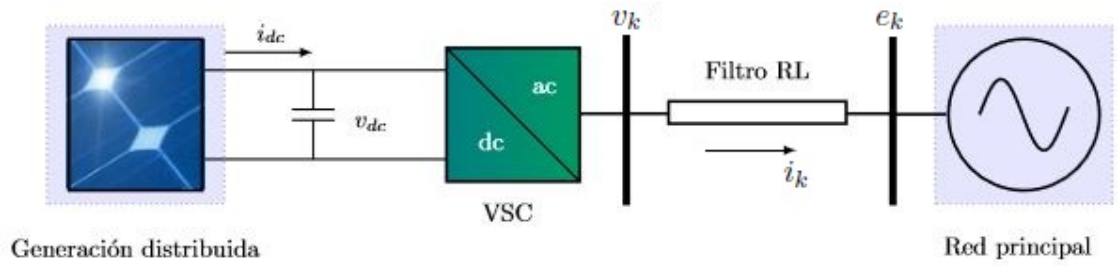


Figura 4.3: Sistema de prueba 1.

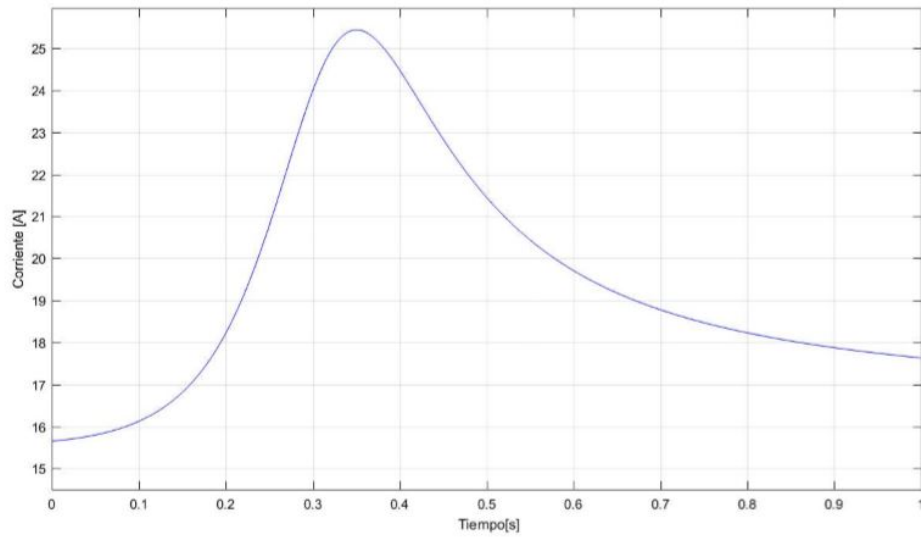


Figura 4.4: Curva de corriente del panel solar.

En la figura 4.5 se muestra el desempeño del controlador diseñado en este trabajo para inyectar toda la potencia activa disponible en el panel solar y compensar la máxima potencia reactiva posible, en el caso de la potencia activa la curva en azul es la potencia activa en el lado de la red y la curva en morado es la potencia activa medida en el lado DC y en el caso de la potencia reactiva la curva en azul es la potencia reactiva entregada a la red y la curva en morado corresponde a la potencia reactiva de referencia.

En la figura 4.6 se muestra el error porcentual entre la corriente en la red y la corriente de referencia.

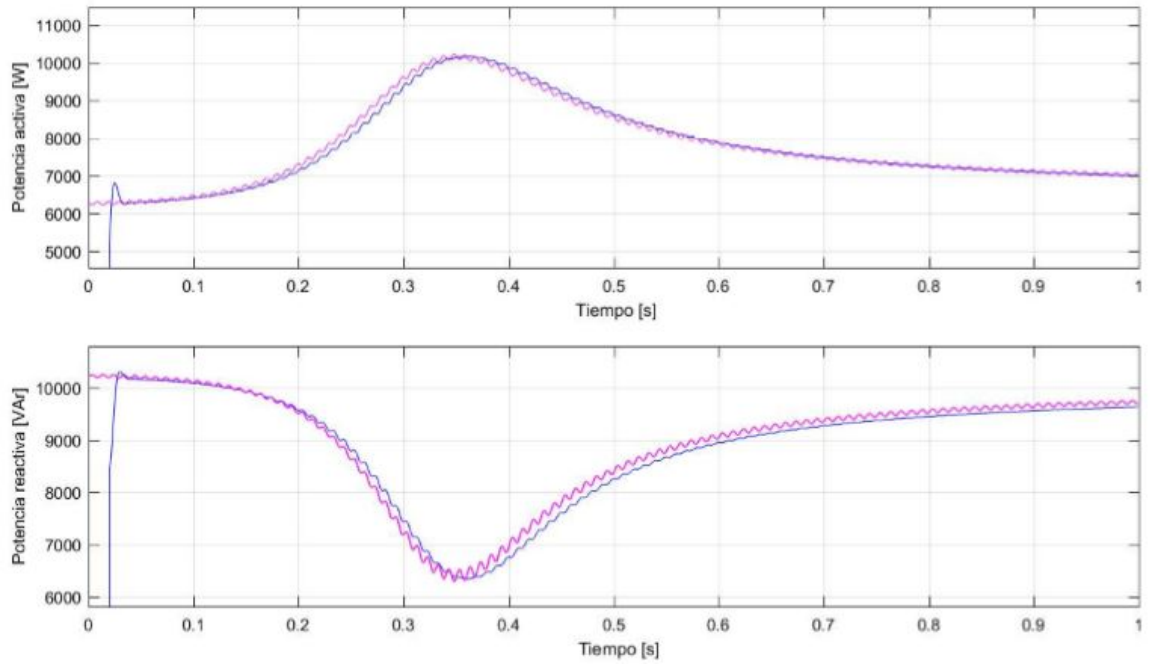


Figura 4.5: Curvas de potencia activa y reactiva panel solar con el controlador 1.

los resultados obtenidos con el controlador 2 y el controlador 3 se muestran a continuación en las figuras 4.7 y 4.8 se muestran las curvas de potencia activa y reactiva y el error en la corriente para el controlador 2, de forma similar para el controlador 3 se muestran en las figuras 4.9 y 4.10 las curvas de potencia activa y reactiva y el error en la corriente respectivamente.

Como se puede observar en los resultados gráficos los controladores basados en pasividad siguen de una manera mas eficiente la referencia que el controlador PI clásico

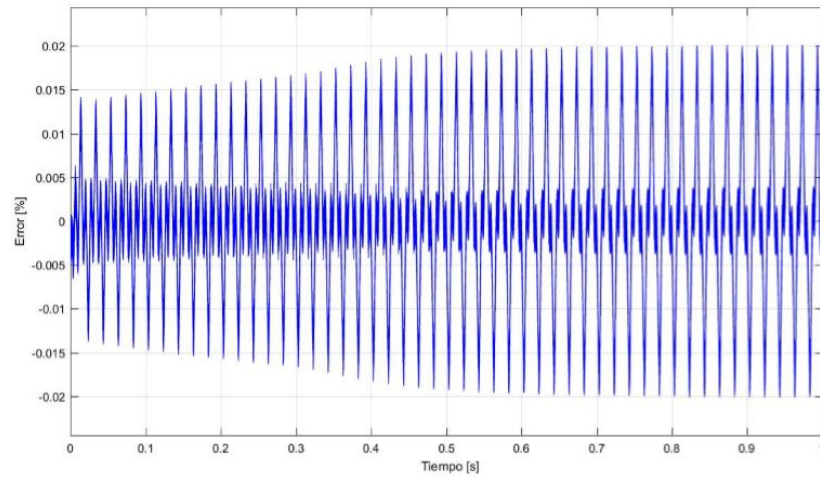


Figura 4.6: Error de la corriente controlador 1 caso panel solar.

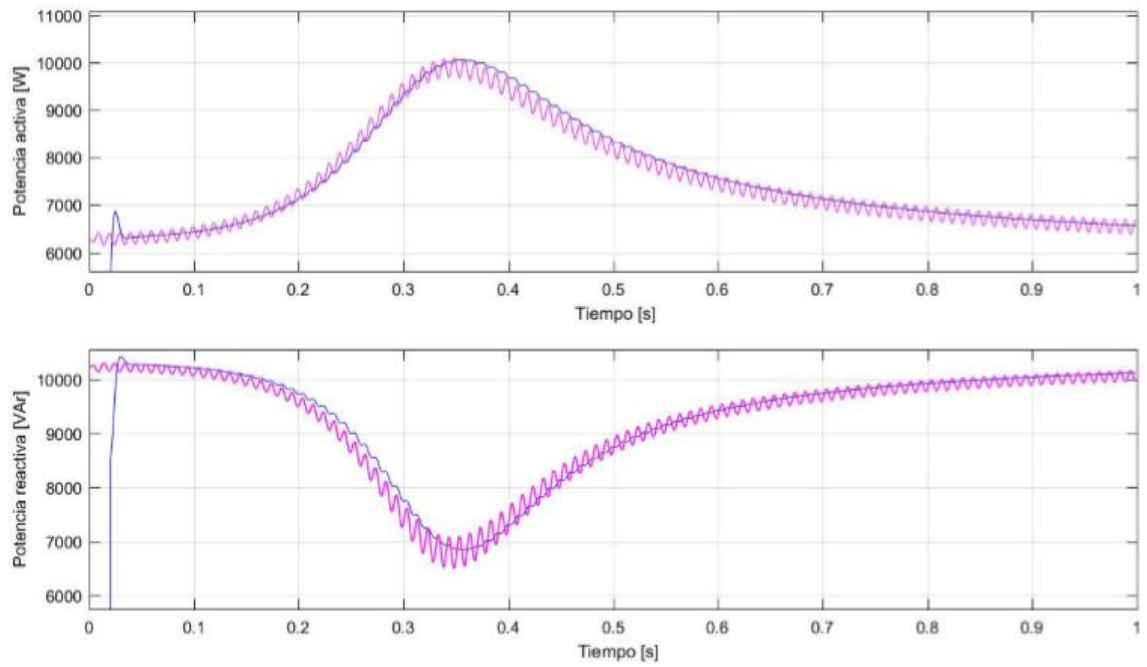


Figura 4.7: Curvas de potencia activa y reactiva panel solar con el controlador 2.

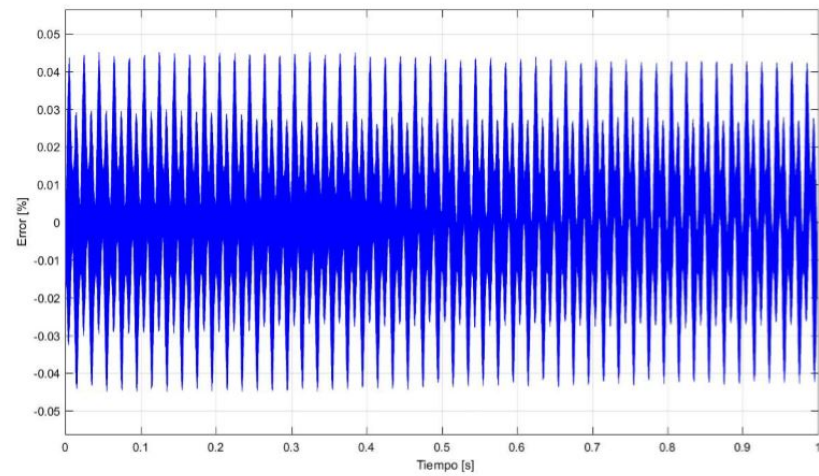


Figura 4.8: Error de la corriente controlador 2 caso panel solar.

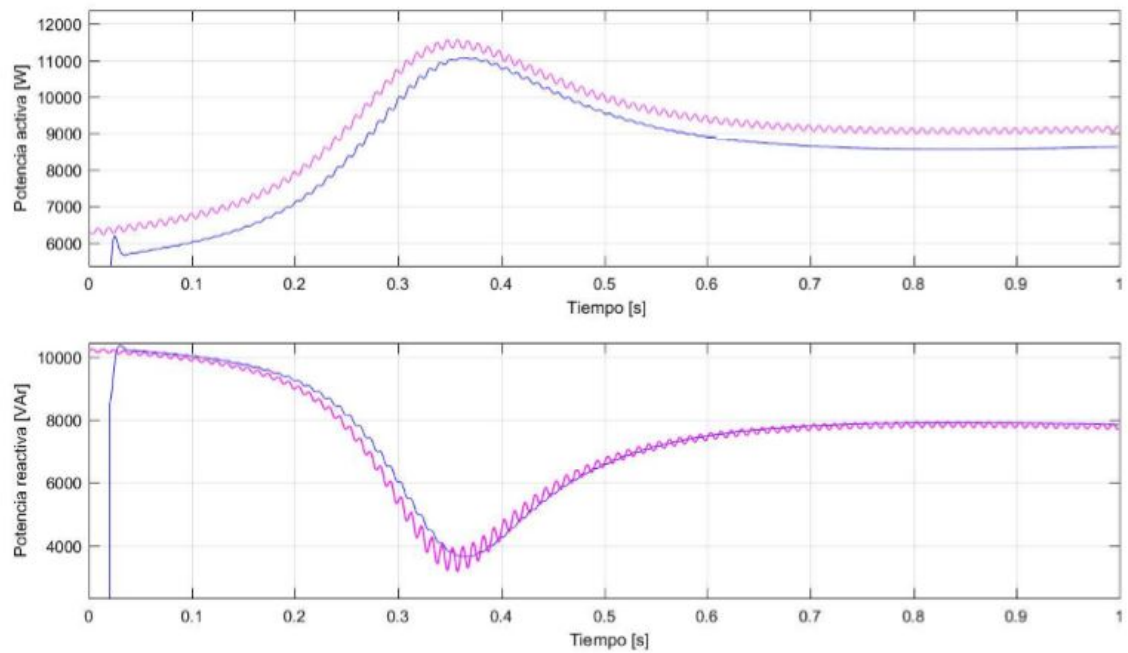


Figura 4.9: Curvas de potencia activa y reactiva panel solar con el controlador 3.

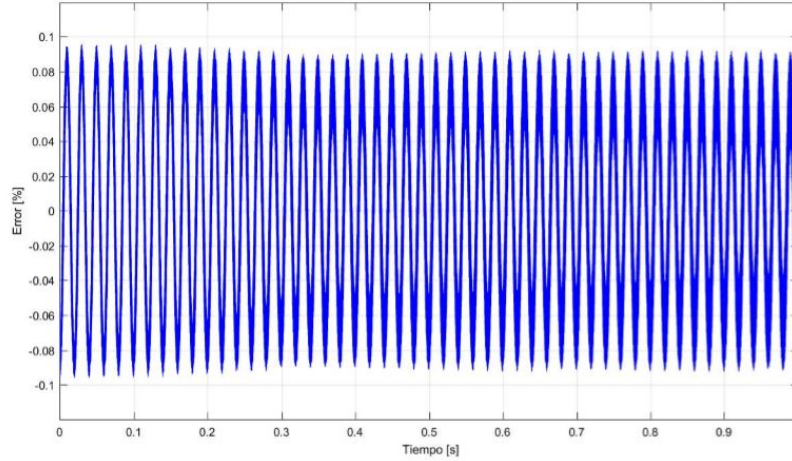


Figura 4.10: Error de la corriente controlador 3 caso panel solar.

según se muestra en las figuras 4.5, 4.7 y 4.9 el controlador PI clásico sigue de manera adecuada la referencia de la potencia reactiva, pero presenta un desvío significativo para el caso de la potencia activa, y el controlador diseñado (controlador 1) es el que posee un porcentaje de error menor cerca de 0,02 % y el que presenta mayor error es el controlador clásico cerca de 0,1 % basándonos en las figuras 4.6, 4.8 y 4.10.

4.2.2. Sistema de Prueba 2

Para el sistema de prueba 2 mostrado en la figura 4.11 se va a considerar que como fuente de energía renovable un generador eólico donde la corriente proveniente de la micro-red se i_{dc} modela teniendo en cuenta una curva de la variación de la velocidad del viento como se muestra en la figura 4.12, en este caso el flujo de potencia activa es unidireccional, va desde la fuente de energía renovable hacia la red de distribución. El objetivo del controlador es inyectar toda la potencia activa disponible y compensar la máxima energía reactiva disponible.

En la figura 4.13 se muestra el desempeño del controlador diseñado en este trabajo para inyectar toda la potencia activa disponible en el generador eólico y compensar la máxima potencia reactiva posible, en el caso de la potencia activa la curva en azul es la potencia activa en el lado de la red y la curva en morado es la potencia activa medida en el lado DC y en el caso de la potencia reactiva la curva en azul es la potencia reactiva entregada a la red y la curva en morado corresponde a la potencia reactiva de

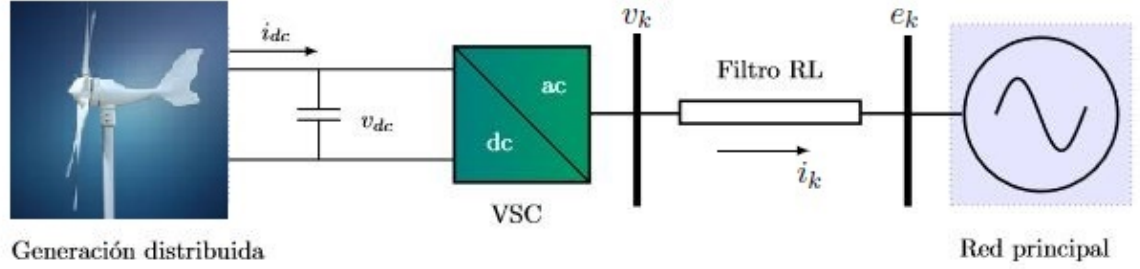


Figura 4.11: Sistema de prueba 2.

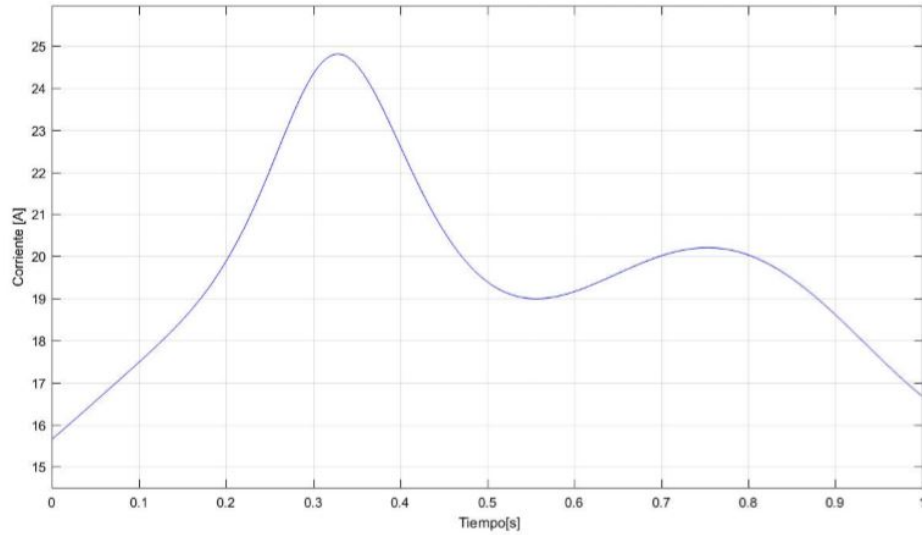


Figura 4.12: Curva de corriente generador eólico.

referencia.

En la figura 4.14 se muestra el error porcentual entre la corriente en la red y la corriente de referencia.

los resultados obtenidos con el controlador 2 y el controlador 3 se muestran a continuación en las figuras 4.15 y 4.16 se muestran las curvas de potencia activa y reactiva y el error en la corriente para el controlador 2, de forma similar para el controlador 3 se muestran en las figuras 4.17 y 4.18 las curvas de potencia activa y reactiva y el error

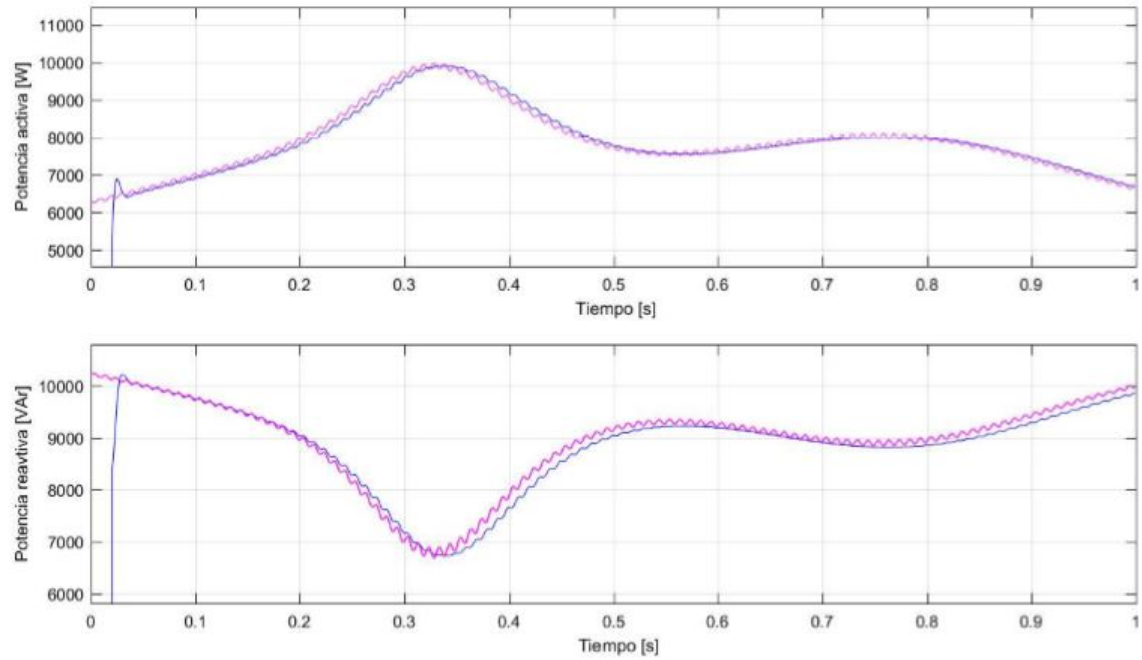


Figura 4.13: Curvas de potencia activa y reactiva generador eólico con el controlador 1.

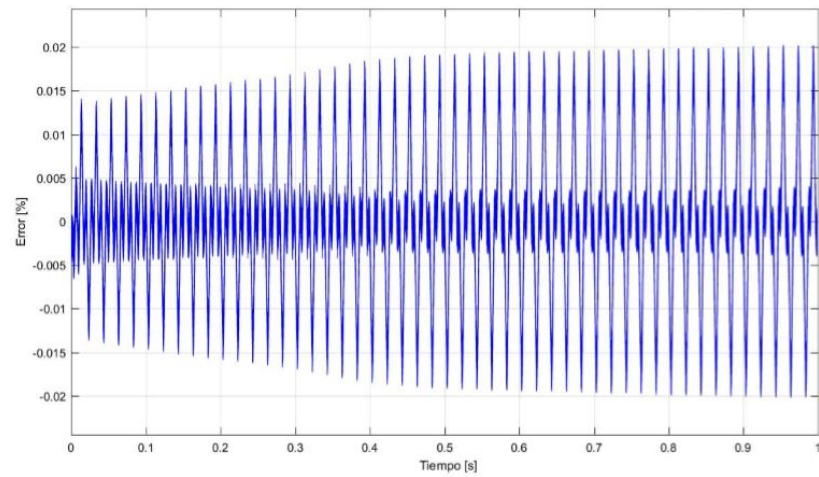


Figura 4.14: Error de la corriente controlador 1 caso generador eólico.

en la corriente respectivamente.

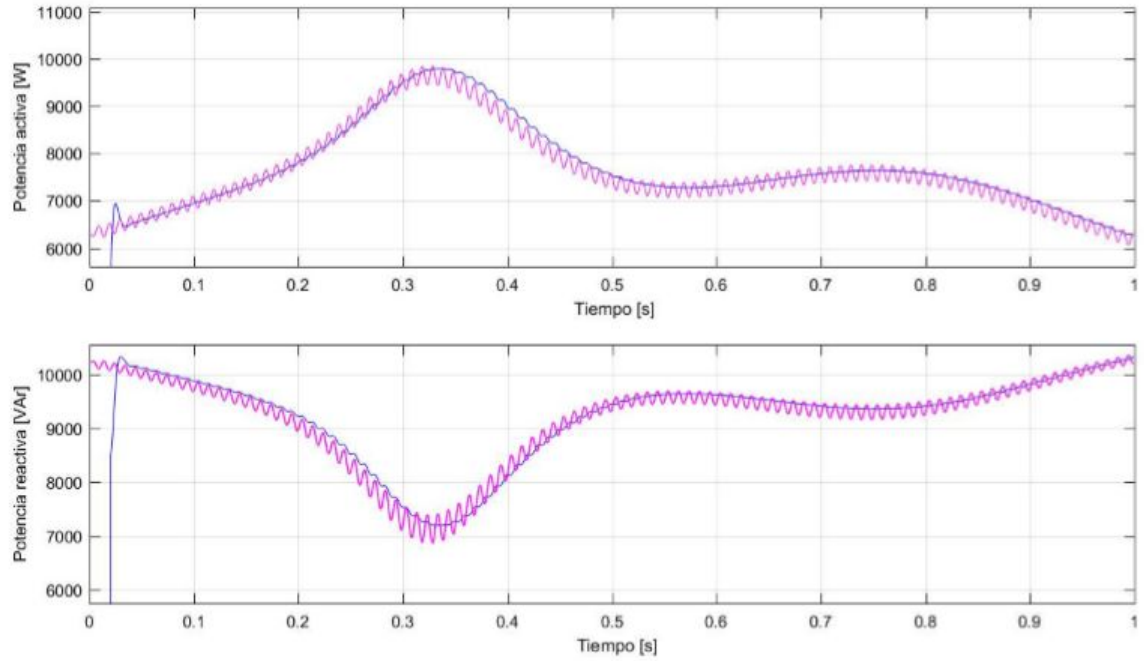


Figura 4.15: Curvas de potencia activa y reactiva generador eólico con el controlador 2.

Al igual que en el caso 1, como se puede observar en los resultados gráficos de las figuras 4.13, 4.15 y 4.17 los controladores basados en pasividad siguen de una manera mas eficiente la referencia que el controlador PI clásico el cual presenta un desvío de la referencia en la potencia activa, y el controlador diseñado (controlador 1) es el que posee un porcentaje de error menor cerca de 0,02 % mientras que el controlador clasico alcanza un error de cerca de 0,1 % como se muestra en la figura 4.14 comparada con las figuras 4.16 y 4.18.

4.2.3. Sistema de Prueba 3

Para el sistema de prueba 3 4.19 se va a considerar que como fuente de energía renovable una batería, que puede ser la de un vehículo eléctrico, donde i_{dc} se modela teniendo en cuenta dos etapas, la primera en la cual la batería entrega una potencia activa de forma constante a la red $P = 10000[W]$ y en la segunda etapa cuando el

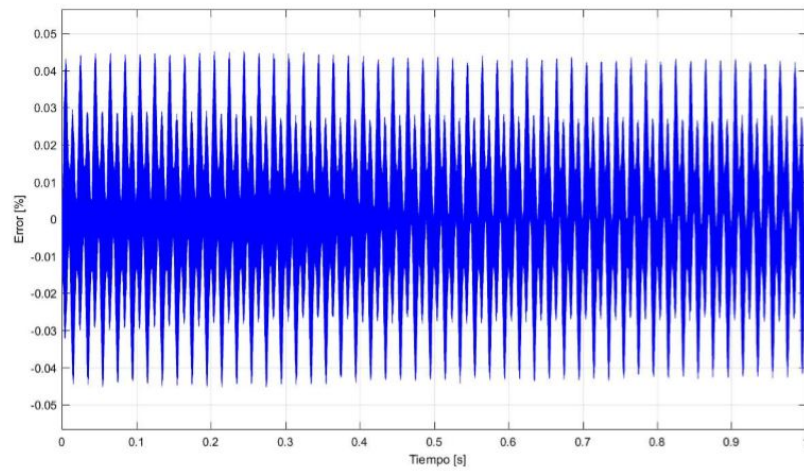


Figura 4.16: Error de la corriente controlador 2 caso generador eólico.

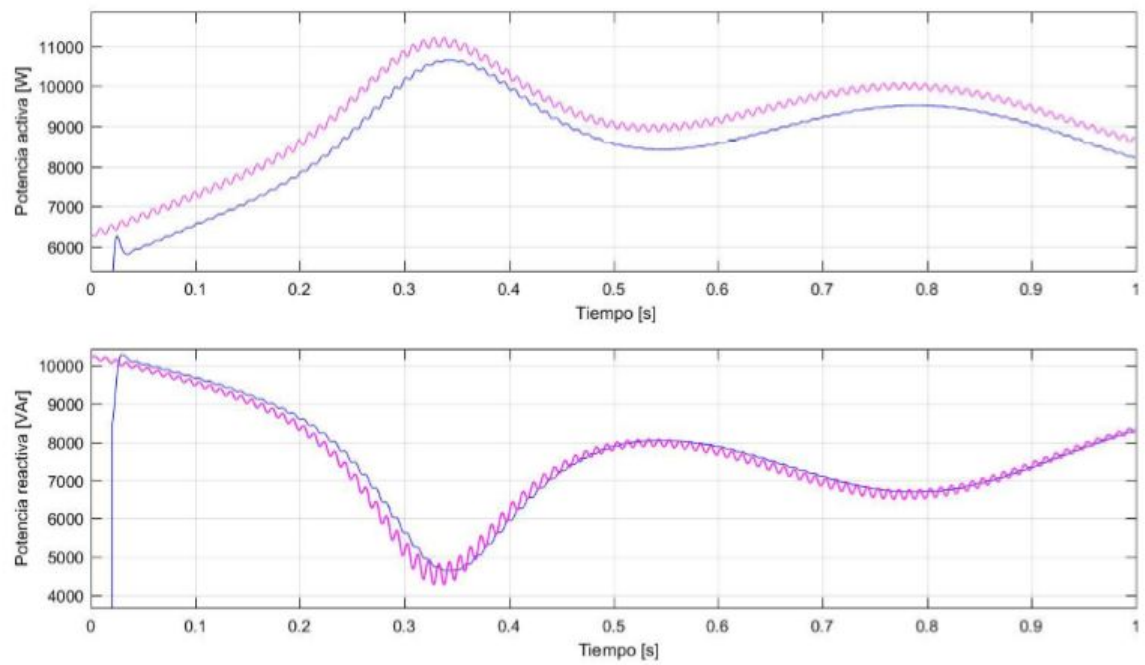


Figura 4.17: Curvas de potencia activa y reactiva generador eólico con el controlador 3.

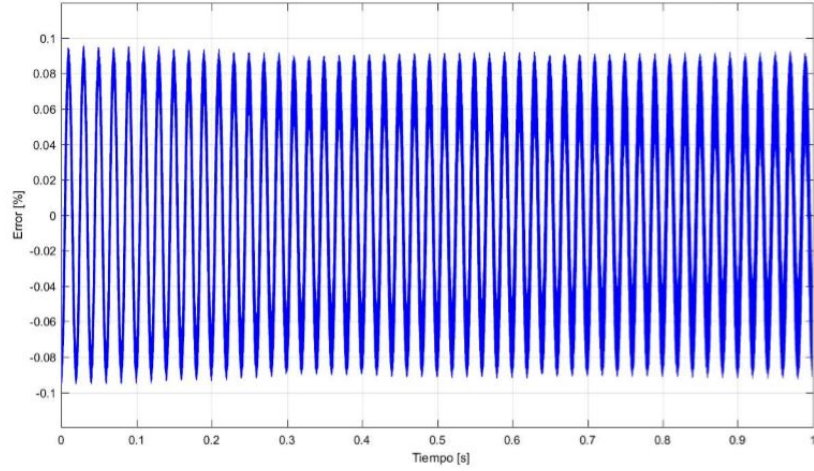


Figura 4.18: Error de la corriente controlador 3 caso generador eólico.

tiempo $t = 0,5[s]$ la dirección del flujo de potencia cambia y la batería pasa a absorber potencia activa de la red de forma constante con $P = -6000[W]$ como se muestra en la figura 4.20. El objetivo del controlador es inyectar o absorber la potencia activa necesaria y compensar la máxima energía reactiva disponible.

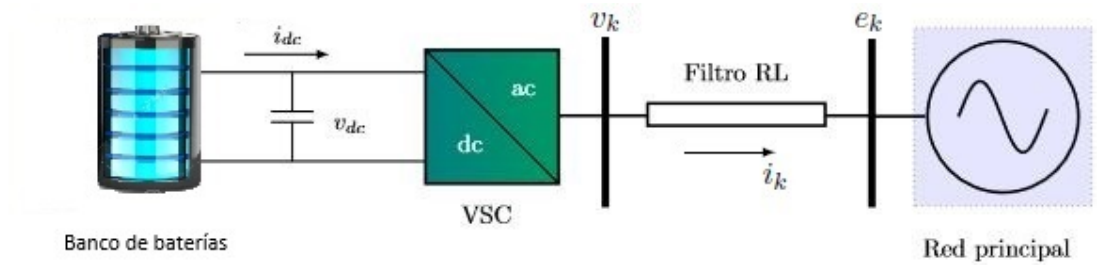


Figura 4.19: Sistema de prueba 3.

En la figura 4.21 se muestra el desempeño del controlador diseñado en este trabajo para inyectar toda la potencia activa disponible en el generador eólico y compensar la máxima potencia reactiva posible, en el caso de la potencia activa la curva en azul es la potencia activa en el lado de la red y la curva en morado es la potencia activa medida en el lado DC y en el caso de la potencia reactiva la curva en azul es la potencia

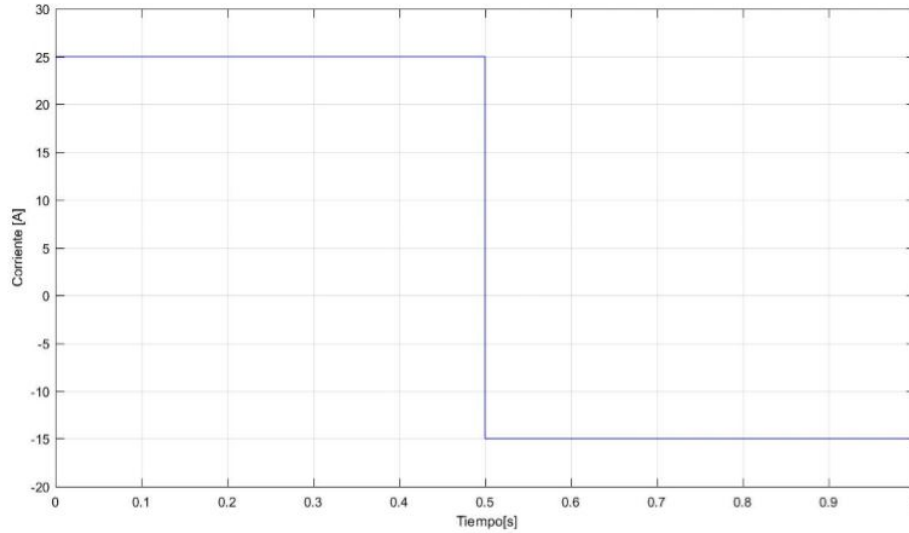


Figura 4.20: Curva de corriente batería.

reactiva entregada a la red y la curva en morado corresponde a la potencia reactiva de referencia.

En la figura 4.22 se muestra el error porcentual entre la corriente en la red y la corriente de referencia.

los resultados obtenidos con el controlador 2 y el controlador 3 se muestran a continuación en las figuras 4.23 y 4.24 se muestran las curvas de potencia activa y reactiva y el error en la corriente para el controlador 2, de forma similar para el controlador 3 se muestran en las figuras 4.25 y 4.26 las curvas de potencia activa y reactiva y el error en la corriente respectivamente.

Como se puede observar en los resultados gráficos de las figuras 4.21, 4.23 y 4.25 los controladores basados en pasividad siguen de manera adecuada la referencia mientras que el controlador clásico PI pierde la referencia, además se puede observar de las figuras 4.22, 4.24 y 4.26 que el error es mucho mayor en el controlador clásico que en los controladores 1 y 2.

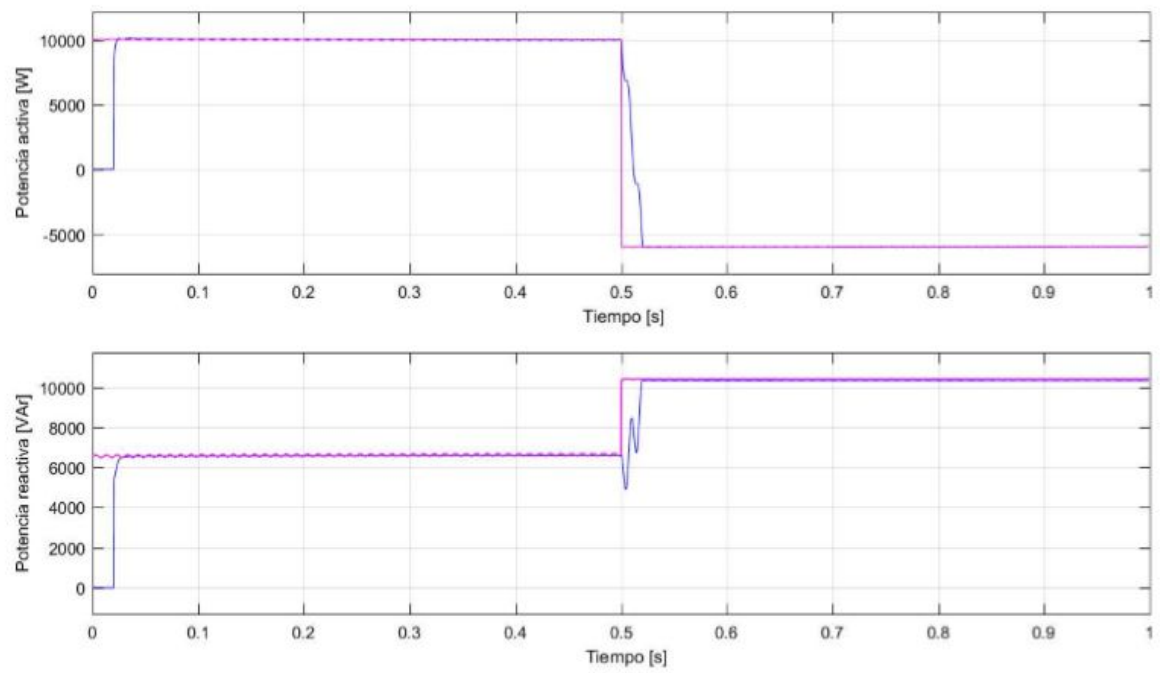


Figura 4.21: Curvas de potencia activa y reactiva para la batería con el controlador 1.

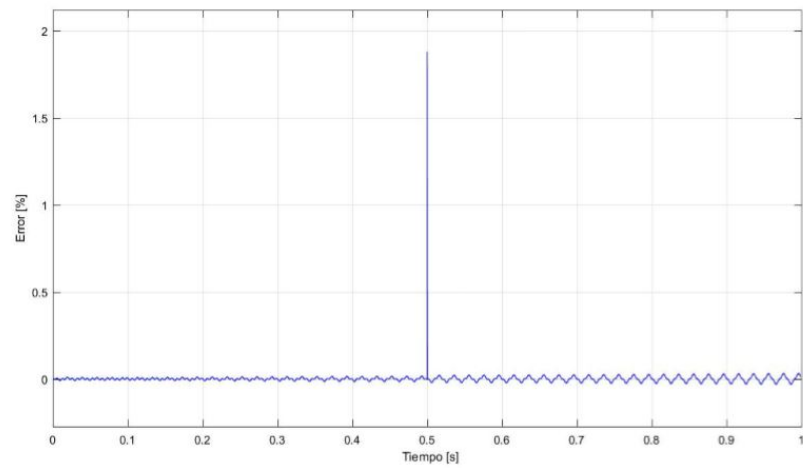


Figura 4.22: Error de la corriente controlador 1 caso batería.

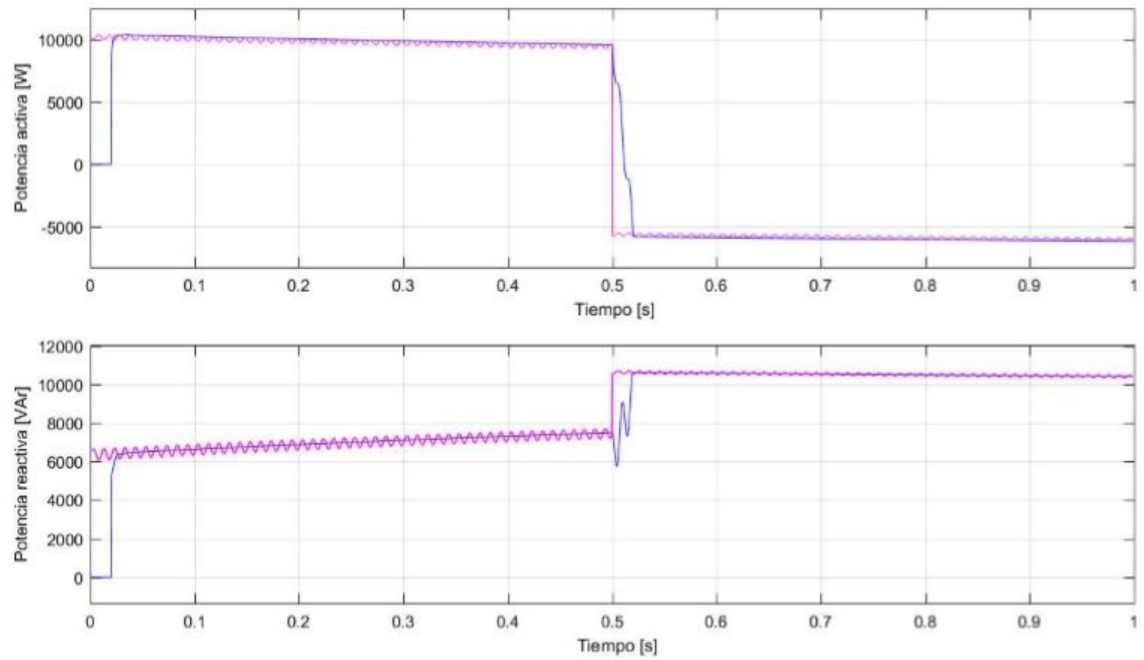


Figura 4.23: Curvas de potencia activa y reactiva para la batería con el controlador 2.

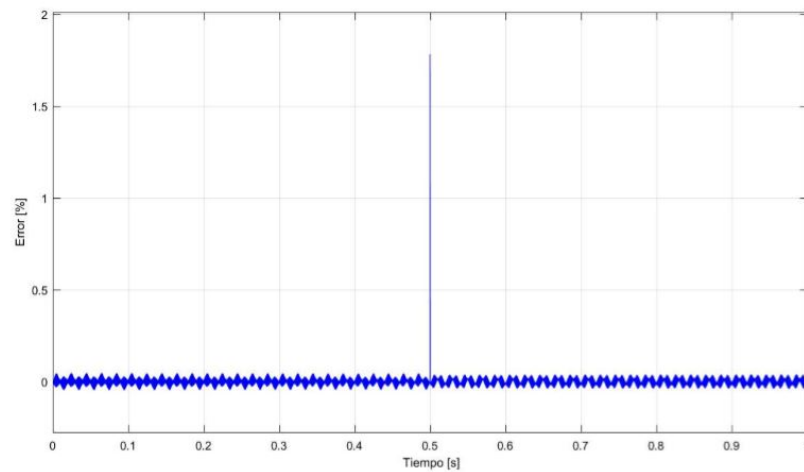


Figura 4.24: Error de la corriente controlador 2 caso batería.

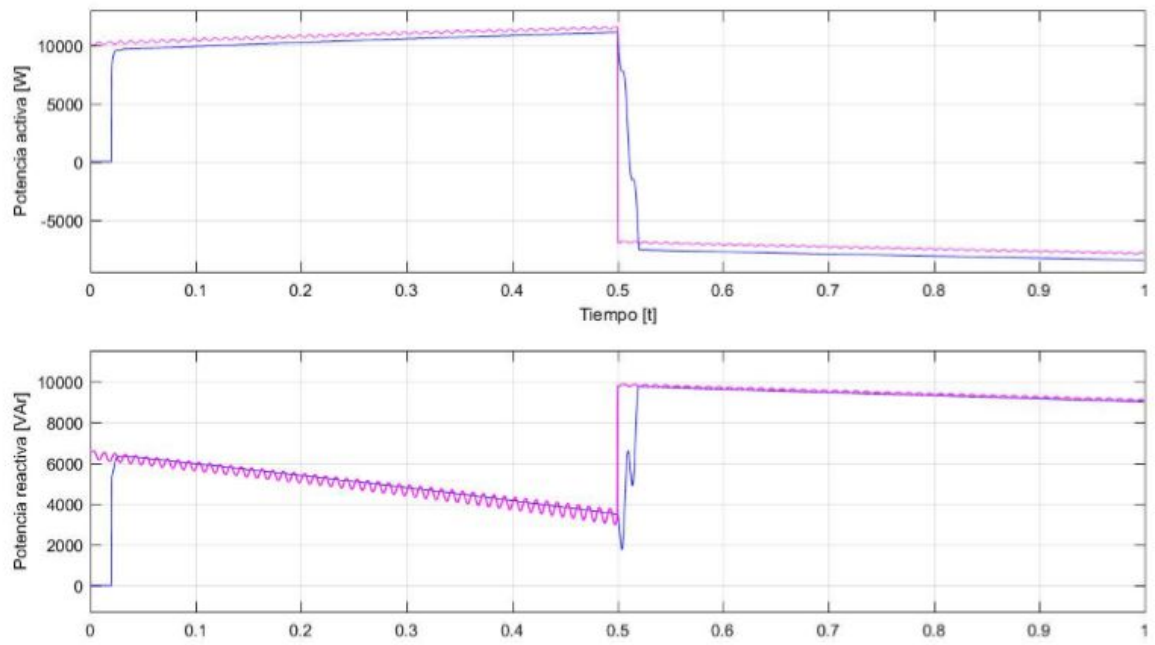


Figura 4.25: Curvas de potencia activa y reactiva para la batería con el controlador 3.

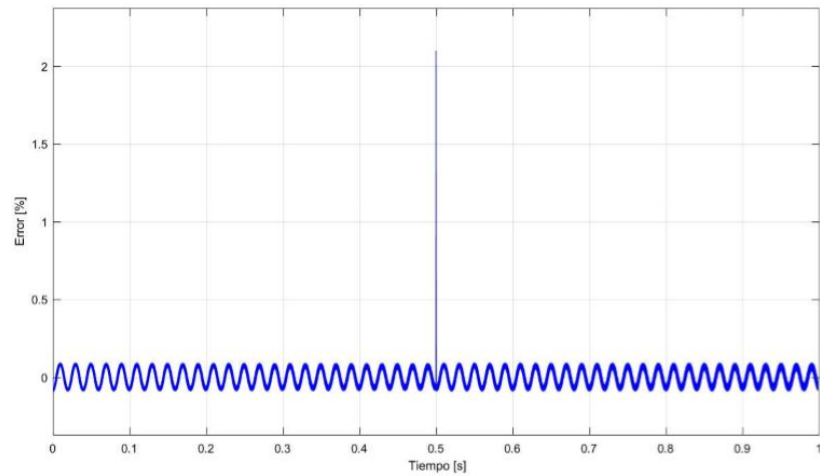


Figura 4.26: Error de la corriente controlador 3 caso batería.

Capítulo 5

Conclusiones

Se implemento el modelo matemático no lineal utilizando una técnica de control basada en pasividad con la cual se pudo lograr de manera satisfactoria el objetivo de este trabajo el cual era inyectar toda la potencia activa disponible en el recurso renovable a la red y compensar la máxima potencia reactiva posible.

Se observo que el sistema de control diseñado responde de manera satisfactoria llegando a los valores de referencia objetivos en un corto valor de tiempo 0,02[s] para grandes cambios de potencia presentando algunos transitorios.

Se mostró que aplicando esta técnica de control al sistema, este respondió de una manera estable, ademas se pudo comprobar que el desempeño de los controladores basados en pasividad es mas robusto frente a cambios bruscos de las referencias que los controladores clásicos (PI).

Se observa que el controlador diseñado en este trabajo se desempeña de una manera mas optima que el controlador basado en pasividad diseñado en [14] presentando un porcentaje de error menor en todos los casos de prueba.

5.1. Trabajos futuros

Como trabajos futuros se propone diseñar un controlador basado en pasividad para la micro-red que permita en el caso de las baterías realizar la carga con un perfil

adecuado de corriente y tensión con el fin de aumentar la vida útil de las mismas de una forma similar al desarrollo mostrado en [15].

Bibliografía

- [1] UPME and Ministerio de Minas y Energía. Plan energetico nacional colombia: Ideario energetico 2050. 2014.
- [2] Rana.H.A. Zubo, Geev Mokryani, Haile-Selassie Rajamani, Jamshid Aghaei, Taher Niknam, and Prashant Pillai. Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72:1177 – 1198, 2017.
- [3] Mojtaba Khederzadeh, Hamed Maleki, and Vahid Asgharian. Frequency control improvement of two adjacent microgrids in autonomous mode using back to back voltage-sourced converters. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 74:126 – 133, 2016.
- [4] Hung Pham, Greg Hunter, Li Li, and Jianguo Zhu. Advanced microgrid power control through grid-connected inverters, 11 2015.
- [5] Romeo Ortega, Arjan van der Schaft, Bernhard Maschke, and Gerardo Escobar. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled hamiltonian systems. *Automatica*, 38(4):585 – 596, 2002.
- [6] C. Gaviria, E. Fossas, and R. Grino. Robust controller for a full-bridge rectifier using the ida approach and gssa modeling. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 52(3):609–616, March 2005.
- [7] Georgios Tsengenes and Georgios Adamidis. Investigation of the behavior of a three phase grid-connected photovoltaic system to control active and reactive power. *Electric Power Systems Research*, 81(1):177 – 184, 2011.
- [8] M. Pahlevaninezhad, P. Das, J. Drobnik, G. Moschopoulos, P. K. Jain, and A. Bakhshai. A nonlinear optimal control approach based on the control-lyapunov

- function for an ac/dc converter used in electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 8(3):596–614, Aug 2012.
- [9] S. Haghbin, S. Lundmark, M. Alakula, and O. Carlson. Grid-connected integrated battery chargers in vehicle applications: Review and new solution. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(2):459–473, Feb 2013.
- [10] J. G. Pinto, V. Monteiro, H. Gonçalves, and J. L. Afonso. Onboard reconfigurable battery charger for electric vehicles with traction-to-auxiliary mode. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(3):1104–1116, March 2014.
- [11] M. C. Kisacikoglu, M. Kesler, and L. M. Tolbert. Single-phase on-board bidirectional pev charger for v2g reactive power operation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(2):767–775, March 2015.
- [12] S. Dhar and P.K. Dash. A new backstepping finite time sliding mode control of grid connected pv system using multivariable dynamic vsc model. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 82:314 – 330, 2016.
- [13] S. Golestan, J. M. Guerrero, A. Abusorrah, M. M. Al-Hindawi, and Y. Al-Turki. An adaptive quadrature signal generation-based single-phase phase-locked loop for grid-connected applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(4):2848–2854, April 2017.
- [14] Nicolás Andrés Ramírez Beltrán. Control de potencia activa y reactiva empleando un convertidor por fuente de tensión para aplicaciones de generación distribuida, 2017.
- [15] F. M. Serra and C. H. De Angelo. Ida-pbc control of a single-phase battery charger for electric vehicles with unity power factor. In *2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, pages 261–266, Sept 2016.